微細作業を支援するためのマスタスレーブ一体型ツールに関する研究*

佐野 明 人^{*1}, 藤本 英 雄^{*1}

A Study of Combined Master-Slave Tool for Micro Manipulation

Akihito SANO and Hideo FUJIMOTO

Humans can master the skill of micro manipulation which differs from the simple task of positioning through experience and years of training. Since the human ability is not quantifiable, it is impossible to substitute completely human ability for a robot. However, it is necessary to develop effective and suitable methods that lead to easy execution of micro manipulation in order to reduce exhaustion. Telerobotics and master-slave technology are useful methods for solving this problem. In this study, a new system that combines the master and the slave structurally is proposed. This combined master-slave system is designed as a compact tool which can be manipulated easily by the fingertips. Maneuverability of the master tool is improved by suspending itself electromagnetically. An electromagnetic sucking force is also used as a driving force of the master. In this study, a stabilized control of the electromagnetic suspension system and a bilateral control of the master-slave system are accomplished simultaneously. Furthermore, the validity of the developed master-slave tool is confirmed by control experiments.

Key Words: Micro Manipulation, Master-Slave System, Electromagnetic Suspension System, Quadratic Stabilization Design, Bilateral Control, Indirect Force Control

1. は じ め に

近年, 工学分野におけるマイクロマシン開発, 医療分野におけるマイクロ外科手術, 科学分野における細胞操作などに, 微細作業(マイクロマニピュレーション)技術の応用が積極的に進められている⁽¹⁾。人間は, 長い経験と訓練によって高度な(単純な位置決め作業とは異なる)微細作業が行えるだけの十分な技を身に付けることができる。しかし一方で, 微細作業が容易に行え, しかも長時間の作業でも疲労が少なくなるような手段を開発することが重要であることがわかる。この人間の高度な技能を完全にロボットに置き換えることは, 現在の技術では困難である。そこで, マスタスレーブシステムが, この問題を解決する有力な手段の一つであると考えられる⁽²⁾⁽³⁾。

人間が微細な作業を行う場合, 指先の触圧覚や滑り覚などの指先感覚と, 腕の筋肉緊張による関節感覚を複合して用いているといわれている⁽⁴⁾。したがって, 多自由度のリンク機構からなる大型のマスタアームを用いることは, 関節感覚を主として用いることになるために, マイクロマニピュレーションには不適切であ

る。佐藤ら⁽⁴⁾は, 力の高応答性を目的としたペン形のマスタマニピュレータを開発し, 指先圧覚と関節感覚を複合することで, 広いダイナミックレンジの力制御を行っている。中尾ら⁽⁵⁾は, 内耳周辺の疾患に対する手術に注目し, 10 mN オーダの力制御を必要とする顕微鏡下における骨片除去作業用に, ピエゾ素子を用いた小型の工具を開発している。しかし, いずれもその力制御方式についてあまり詳しく検討されておらず, 制御対象あるいは対象物の特性が変化する場合などに, 安定的に力制御が可能かなどの疑問が残る。

従来のマスタスレーブシステムでは, 同じ形状, サイズの2台のマニピュレータを別々の場所で用いる場合がほとんどであった。近年, 異構造型のマスタスレーブが開発されたり⁽⁶⁾, 一体化を図った研究が見られる。Kazerooni⁽⁷⁾は, Extender(倍力装置)によって, 装置に作用する力をスケールダウンして, 装置の中に入れた腕に直接提示している(人間が倍力装置の一部となる)。Extenderは, マスタ・スレーブそれぞれにアクチュエータを置く必要がないことから, 従来のマスタスレーブとは区別されている。また, 福田ら⁽⁸⁾は, 人間がロボットアーム先端に取付けられている操作作用センサを直接手で持って動作指令を与えることができるマン・ロボット協調作業型のマニピュレータを

* 原稿受付 1996年6月12日。

^{*1} 正員, 名古屋工業大学(〒466 名古屋市昭和区御器所町)。

提案している。これは、機能面でマスタとスレーブを一体化したものである。小菅ら⁽⁹⁾は、機械系を道具と同一の特性をもつように制御している。

本研究では、簡単に扱える小型の道具(ツール)をイメージして、マスタとスレーブが構造的・機能的に一体となった新しいタイプのシステムを提案する。また、小型化を図ることで、高応答のアクチュエータによる高いダイナミックレンジを確保する。さらに、マスタ・スレーブそれぞれが、アクチュエータおよび力・位置センサを一組備える。基礎実験用に開発したシステムは、電磁石による吸引力を使って、ツール自身を磁気浮上させることで操作性を高めている。この吸引力は、マスタの駆動力としても利用される。2章では、マスタスレーブ方式において、必ずしも遠隔操作にこだわる必要がなく、同所性、同時性の利点を利用して、マスタとスレーブを一体化することの意義について述べる。3章では、提案するツールへの磁気浮上系の採用、構造、操作方法について詳しく述べる。4章では、磁気浮上系の安定化制御として、近年注目されている H_∞ 制御理論⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾に基づく二次安定化補償器の設計問題について議論する。5章では、パイラテラル制御方式について述べ、実験によりその有効性を確認する。

2. マスタスレーブ

2・1 同所性および同時性 マスタスレーブ方式は、遠隔操作の一つの有力な手段として研究されてきた。宇宙空間、海底、火災現場、原子力施設内など人間が直接立入ることができない場所での作業を、空間的に隔たった安全なオペレータ室から遠隔操作で実行しようというものである。このとき、マスタとスレーブは、図1(a)に示すように基本的に分離し、ある距離隔たっている(非同所性、非同時性)。また、近年注目されている遠隔外科手術(辺地、遠洋航海船、戦場での手術)でも、このようなマスタスレーブシステムの応用が検討されている⁽¹²⁾。

一方、作業目的によっては、必ずしも遠隔操作のスタイルを採る必要はない。図1(b)は、マスタとスレーブが構造的に一体となっているものである⁽⁵⁾⁽¹³⁾。マスタとスレーブが一体化しているということは、操作者はスレーブおよび対象物と同じ空間を共有していることを意味している(同所性、同時性)。したがって、その空間で起きるさまざまな現象を直接知ることができ、隔離された場合に必要であった情報の伝達ならびに高レベルの提示の一部を行わなくてもすむ。例えば、手術は常に緊迫した状況下で行われるため、医師や看護婦は患者のわずかな異変にすばやく対処しなければならない。したがって、できれば医師は患者のすぐそばで手術を行うことが望まれる⁽¹⁴⁾(現行のスタイルの踏襲)。

2・2 マスタスレーブ一体型 人間が、小型の道具を使って微細な作業を行う場合、肘や手の側面を台につき、対象物を上からのぞく姿勢で、慎重に位置を合せて、指先にかかる力を細やかに制御する。また、人間は、低可動範囲・高感度の皮膚感覚と高可動範囲・低感度の深部感覚を統合して、高可動範囲・高感度の感覚を実現している⁽⁴⁾。このことから、広いダイナミックレンジで力の制御をするには、指先で作業するのが妥当である。したがって、多自由度のリンク機構からなる大型のマスタマニピュレータを用いることは、マイクロマニピュレーションには不適切である。

本研究では、簡単に扱える小型の道具(ツール)をイメージして、新しいタイプのマスタスレーブシステムを開発する⁽¹³⁾。提案するマスタスレーブシステムは、図1(b)に示すようなマスタとスレーブが一体となるものであり、このようなシステムをマスタスレーブ一体型ツール(Combined Master-Slave Tool)と呼ぶことにする。以下CMSツールとする。本システムは、従来人間が直接行っている微細作業スタイルの本質的な変化を要求しておらず、使用している道具をインテリジェント化することで、作業性を高めようとするものである。

3. CMS ツール

3・1 磁気浮上 磁気浮上の特徴は、非接触、無摩擦であり、高精度な位置・力制御が可能となり、組立作業へ応用されたり⁽¹⁵⁾、人工衛星のアンテナの指向制御に適用されている⁽¹⁶⁾。Salcudeanら⁽¹⁷⁾は、ロボットアームの先端に磁気浮上系を組合せたスレーブマニピュレータを開発している。本研究では、マスタ側の駆動力として電磁石による吸引力を用い、さらにツール自身を磁気浮上させることで操作性、静粛性を高め

Fig. 1 Master-slave system

Fig. 2 Combined master-slave tool

る。

3・2 構造とセンサ系 図2は、提案するCMSツールの内部構造を示したものである。全長160 mm、直径50 mm、重量791 gで、垂直方向の一軸直動駆動機構である。図中で、マスタ側は(M)、スレーブ側は(S)で記されている。マスタは磁気浮上系、スレーブはボイスコイルモータ(VCM)を備えている。マスタ・スレーブそれぞれが、力センサおよび位置センサを一組備えている。図からわかるように、CMSツールはマスタとスレーブが完全に構造的に一体化されている。

ツール本体(強化型ナイロン6、不透明)の上部に鋼球($\phi 50$ mm)が取付けられ、外観上は一つの道具としは見えないが、中央部分にVCM[昭和電線(株)、4-1 R直動型]が内蔵されている。その性能を表1に示す。VCMは、磁石を内蔵した磁気回路と実際に力を発生するコイル ASSY の二つの部品から構成されている。磁気回路および後述する非接触変位計は、ツール本体に固定されている。コイル ASSY にはシャフトが取付けられており、図2の矢印のように直線駆動され、変位計でその相対変位が計測される。このシャフトが本体下部から軸受けを介して伸びており、対象物に対して操作が行われる。鋼球とVCMは駆動の際の磁気の影響を考慮して約30 mm離してある。また、本体は上下に2分割できるようになっている。

磁気浮上系で重要となる電磁石の設計仕様は次のようにした。磁芯材料は、磁束密度1.6 T以上(磁化力5 000 A/m時)である厚さ0.5 mmの電磁鋼帯を長さ70 mm、幅105 mm、中央脚の幅35 mm、外脚の幅

Table 1 Specifications of VCM

Stroke	4mm
Rating force	1.65N
Max. force	3.3N
Rating current	1.0A
Max. current	2.0A

Fig. 3 Operation style

17.5 mmのE形状にしたものを、90枚積層して奥行き45 mmとした。その中央脚にコイルの巻線として直径0.7 mmのエナメル線(耐熱温度120℃)を900 turn巻いた。これは、電磁石と鋼球とのギャップ距離5 mmのところ、出力電流値3 Aのとき吸引力20 Nを発生することができるようになっている。

浮上体の位置は、絶対座標系に固定されたレーザ式変位センサ[松下電工(株)、ANL-2334C]を用いて計測し、VCMの変位は、本体に内蔵された渦電流非接触変位計[電子応用(株)、AEC5507型]で計測する。それぞれの分解能は、3.5 μ m(300 Hz)および0.5 μ m(20 kHz)である。

マスタ用の力センサは、本体下部に取付けられており、スレーブ用の力センサは、レーザセンサと同じ固定台に取付けられている。ただし、本来ならVCMとシャフトの間に取付けるべきものだが、本プロトタイプでは、等価なシステムとしてこのような構造を採用した。力センサは、平行平板構造を採用し、構造材としてアルミニウム合金(A2024-T351)を使って自作した。出力電圧は、ひずみゲージアンプ(ユニパルス、AM-20、ローパスフィルタ150 Hz)を通しコンピュータに入力している。マスタおよびスレーブの力センサの分解能は、それぞれ7 gfおよび2 gfである。

3・3 操作方法 本節では、以降の議論の理解を

深めるために、CMS ツールの操作方法についてその概略を先に述べておく、図3に柔らかいゴムチューブを実際に操作しているようすを示す。操作者は、本体下部に取付けられたマスタ側の力センサを親指と人差し指で軽くつまみ、対象物をのぞき込む形でツールを上下方向に動かし、シャフト先端で操作する。

マスタとして磁気浮上系を採用しているため、非接触で保持されていることから、摩擦、ガタなどから解放され、CMS ツールを独立した一つの道具に近い状態で操作することが可能となる。すなわち、機械的に強固に支持された場合に比べ拘束感がなく操作性がよい。ただし、鋼球の中心まわりに自由運動を起こしてしまうが、実際の操作ではこの運動は問題にならない。また、作業を一時中断し、手をツールから離しても安定な浮上状態にある。

4. H_{∞} 制御に基づく安定浮上

本章では、CMS ツールの安定浮上について議論する。磁気浮上系は、非線形性が強い不安定系であるため、実際に安定浮上させるためには、電磁力を適切に制御することが必要であり、制御対象のパラメータ変動による制御系の不安定化を避けた補償器の設計が要求される。

4・1 パラメータ同定と線形モデル 理想的な磁気浮上系を考え、定常状態 $Z_0(z=Z_0+\Delta z)$, $I_0(i=I_0+\Delta i)$ まわりで線形化すると、次のような運動方程式を得る。

$$M\ddot{\Delta z} = \frac{QI_0^2}{(Z_{\infty}+Z_0)^3}\Delta z - \frac{QI_0}{(Z_{\infty}+Z_0)^2}\Delta i \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、

$$I_0 = \sqrt{\frac{2Mg}{Q}}(Z_{\infty}+Z_0) \quad \cdots \cdots (2)$$

M は浮上体質量であり、 g は重力加速度である。 Δz は浮上体の位置の微小変化、 Δi は電磁石を流れる電流の微小変化である。次に、磁気浮上系のパラメータとなる Q , Z_{∞} および I_0 の同定のための実験方法について述べる。

本研究では、川谷らが行った方法を用いて、パラメ

ータの同定実験を次のように行った。まず、平衡点となるギャップ長さ Z_0 を 5.00 mm に設定した。次に、電磁石と浮上体上部の鋼球の間に、アクリル板(2~12 mm まで 2 mm 刻みの 6 種類を準備した)を挟み、浮上体を吸引する。ここで、コイル電流を徐々に小さくしてゆき、浮上体が落下する瞬間の電流値を測定する。同定実験から表 2 のような結果が得られた。

縦軸に電流 I 、横軸にアクリル板の厚さ(ギャップ長さ) Z をとってプロットし、最小二乗法によって直線近似する。次に、平衡状態の関係式である式(2)より、システム定数 Q , Z_{∞} を算出する。ただし、浮上体質量 M は 791 g である。結果として、各パラメータは次のように同定された。

$$Q = 5.72 \times 10^{-4} \text{ Hm}, Z_{\infty} = 5.2 \times 10^{-3} \text{ m},$$

$$I_0 = 1.69 \text{ A}$$

$x = [\Delta z, \dot{\Delta z}]^T$, $u = \Delta i$ として運動方程式を行列の形で整理すると、次のような線形モデルを得る。

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1.92 \times 10^3 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ -11.7 \end{bmatrix} u \\ y = [1 \quad 0] x \end{cases} \quad \cdots \cdots (3)$$

CMS ツールは、操作力が加えられても安定に浮上し続けなければならない。そこで、操作力を等価的に浮上体の質量変化と考え、質量変化を構造的な不確かさとしてモデル化する。すなわち、次式で表される構造的な不確かさを有するシステムを考える。

$$\begin{cases} \dot{x} = [A + \Delta A]x + [B + \Delta B]u \\ y = Cx \end{cases} \quad \cdots \cdots (4)$$

ただし、 A , B および C は式(3)に示すシステム行列である。6章で示す実験での操作力の大きさを考慮して、CMS ツールに 502 g の付加質量を付け、同様な同定実験を行った結果、構造的な不確かさとして、次のような ΔA および ΔB を得た。

$$\Delta A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 4 \times 10 & 0 \end{bmatrix}, \Delta B = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.6 \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots (5)$$

4・2 二次安定化混合感度問題 本研究では、4・1節で述べた制御対象のパラメータ変動 ΔA および ΔB に対するロバスト性を二次安定性で保証し、同時に低感度特性を周波数重み関数によって指定する二次安定化混合感度問題を適用する⁽¹⁸⁾。

まず、構造的な不確かさ ΔA , ΔB および ΔC は正規化定数行列 D_i , E_i および時変行列 F_i ($i=1, 2, 3$) を用いて、

$$\begin{cases} \Delta A = D_1 F_1 E_1 \\ \Delta B = D_2 F_2 E_2 \\ \Delta C = D_3 F_3 E_3 \end{cases}$$

Table 2 Gap and current

$Z [\times 10^{-3} \text{ m}]$	$I [\text{A}]$
2.15	1.188
4.14	1.583
6.27	1.906
8.29	2.210
10.06	2.511
12.14	2.868

Fig. 4 Generalized plant

と表すことができる。ただし、 $F_i(t)^T F_i(t) < I$ を満たすものとする。次に、図4に示すような一般化制御対象 $G(s)$ を考える。ここで、 w は参照入力や外乱など外生信号であり、 z は制御量(一般的に小さくしたい量)である。また、 u は操作量であり、 y は観測出力である。制御則を、

$$u = K(s)y \quad (6)$$

と定め、フィードバック系を構成する。二次安定であるための十分条件は、

1. 閉ループ系が安定
2. $\|\Phi(s)\|_\infty < 1$

が成立することである。ただし、 $\Phi(s)$ は、外生信号 w から制御量 z までの伝達関数であり、 $\|\cdot\|_\infty = \sup_\omega \sigma(\cdot)$ [$\sigma(\cdot)$ は最大特異値] である⁽¹⁰⁾。この十分条件の下で問題を解き、解が存在するならばその補償器は二次安定化補償器である。

4.3 補償器設計 式(3)に示す設計モデルの定常ゲインが0 dB以上となるように、等価的に C 行列を200倍する。また、正規化定数行列を以下のようにおいた。

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ d_1 \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ d_2 \end{bmatrix}, D_3 = d_3$$

$$E_1 = [e_1 \ 0], E_2 = e_2, E_3 = [e_3 (=0) \ 0]$$

ここで、先に得られた構造的不確かさ $\Delta A, \Delta B$ より次の関係式が成り立つ。

$$d_1 e_1 = 4 \times 10, d_2 e_2 = 2.6, d_3 e_3 = 0 \quad (7)$$

状態量と操作量のトレードオフを表現する配分比率 $E_1 : E_2$ は、120 : 1(操作量の抑制を重視)とした。また、オブザーバゲインを調整する配分比率 $D_1 : D_3$ は、6.39 : 1とした。制御性能に影響を与えない配分比率 $D_1 : E_1$ は1 : 1とした。これらの配分比率と式(7)より、正規化定数行列 D_i, E_i の各要素が次のように決定された。

Fig. 5 H_∞ controller

Fig. 6 Step response

$$d_1 = \sqrt{4 \times 10}, d_2 = 2.6/e_2, d_3 = 1$$

$$e_1 = \sqrt{4 \times 10}, e_2 = e_1/120, e_3 = 0$$

さらに、低感度化に対する重み関数 W_s は、次のようにした。

$$W_s = \frac{20}{d_3(s+0.1)} \quad (8)$$

以上の点を考慮して、一般化制御対象の状態空間表現を導出し、制御系設計CAD(MATLAB)を用い、適当な γ -iteration を行って解を求めた。低感度化を実現する二次安定化補償器 $K(s)$ を次のように得た。

$$K(s) = \frac{4.65 \times 10^7 (s + 37.2 \pm 19.2j)}{(s+0.1)(s+181)(s+2.85 \times 10^6)} \quad (9)$$

$$\gamma = 0.869$$

図5は補償器のゲイン特性である。図6はステップ応答の実験結果である。ただし、破線は502 gの付加質量が取付けられた場合である。図6からわかるように、オーバーシュートが見られるものの高応答を実現し、安定浮上を達成している。また、付加質量によって系が不安定になることもなく、操作力が加わっても浮上が維持できることがわかる。

5. バイラテラル制御

5.1 力帰還型 図7は、CMS ツールのモデルを示したものである。ただし、 z_m および z_s は、マスタおよびスレーブの変位であり、 u_m および u_s は、それぞれ電磁石の吸引力およびVCMの推力である。また、対象物としてばね剛性をもったものを考える。

Fig. 7 Model of CMS tool

Fig. 8 Block diagram of force control

基礎実験の段階として、次のような力帰還型のバイラテラル制御則を採用した。

$$\begin{cases} u_m = -f_s + k_m(A_f f_m - f_s) \\ u_s = k_p(A_z z_m - z_s) + k_v(A_z \dot{z}_m - \dot{z}_s) \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

f_m, f_s は、それぞれ操作者がマスタに加える力およびスレーブが対象物から受ける力である。また、 A_f, A_z は、マスタとスレーブの間の力および位置の増幅率である。スレーブは、アクチュエータとして VCM を用いているため、 u_s に関する制御則は直接実現できる。一方、マスタは、磁気浮上系の吸引力を利用しているが、4 章で述べた安定浮上制御が必須であり、直接、式 (10) に基づいた u_m の制御は行えない。そこで、本研究では、5・2 節で述べる間接的な力制御に基づくバイラテラル制御を提案する。

5・2 力制御方式 一般に、力制御方式は次の二つに大別できる。一つは、力と運動の関係を制御する間接的な力制御。もう一つは、力を直接制御する直接的な力制御である。本研究では、マスタの磁気浮上系において直接力制御することは困難であるため、図 8 に示すような位置制御を基礎とした間接的な力制御方式を採用する。以下にその具体的な制御則を示す。

下位レベル マスタである磁気浮上系は、4 章で述べたように二次安定化補償器を用いて位置制御されている。ここでは、その制御則を以下のように置き換える。

$$u = K(s)(z_{ref} - z_m) \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 $K(s)$ は二次安定化補償器であり、 z_{ref} は上位レベルで生成される位置目標値である。

Fig. 9 Free motion ($A_z=0.4$)

Fig. 10 Constrained motion ($A_z=0.1, A_f=0.5$)

Fig. 11 Constrained motion ($A_z=0.5, A_f=0.25$)

上位レベル 上位レベルでは、位置目標値 z_{ref} を次式のように与える。

$$\begin{cases} z_{ref} = z_{ref} + \Delta z_{ref} \\ \Delta z_{ref} = k_f(f_{ref} - f_m) \end{cases} \dots\dots\dots (12)$$

式 (12) からわかるように、 z_{ref} はサンプリングタイムごとに更新される形をとっている。 f_{ref} はマスタの力目標値であり、次式に示すように本研究では力帰還型の制御則を適用している。

$$f_{ref} = -f_s + k_m(A_f f_m - f_s) \dots\dots\dots (13)$$

6. 実験結果

CMS ツールを用いた操作実験を行った(3・3 節参照)。制御コンピュータには、PC-9821Xp(NEC, 486DX4, 100 MHz)を用いた。サンプリングタイムは 1 ms であった。

6・1 自由運動 まず、図 9 に対象物に接触していない浮上状態での自由運動の場合の実験結果を示す。 $A_z=0.4$ とした。横軸は時間、縦軸は位置を示し

ている。ただし、実線がマスタの位置 z_m 、破線がスレーブの位置 z_s を示している。図からわかるように、指定した位置の増幅率 A_z を満たしている。このときの操作周波数は約 1 Hz 程度である。

6.2 拘束運動 次に、図 3 に示すように柔らかいゴムチューブを操作した場合の実験結果を示す。図 10 および図 11 に実験結果を示す。図 10 は、 $A_z=1.0$ 、 $A_f=0.5$ とした場合の力の時間変化を示している。また、図 11 は、 $A_z=0.5$ 、 $A_f=0.25$ とした場合の実験結果を示している。ただし、図 11 に関しては、指定した力の増幅率を満たしているかよくわかるように f_s/A_f を破線で図示している。これらの図からわかるように、センサノイズの影響はあるものの、ほぼ指定した増幅率 A_f を達成しており満足がいくものである。

6.1 節での実験と同様、操作力を加えても安定浮上を維持できることが確認できた。また、本実験では、電磁石の発熱の問題はなかった。将来的には、ツールのさらなる小型化を行えば、浮上制御によるエネルギー消費は軽減されと考えられる。これに伴い熱の発生も小さくなる。

7. 結 論

道具を使った人間の自然な作業スタイルを変えずに微細作業が行える小型の道具をイメージした新しいタイプのマスタスレーブシステムを開発した。以下に得られた結果をまとめる。

(1) アクチュエータおよびセンサを一組備えたマスタとスレーブを構造的に一体化し、小型の道具(ツール)としてコンパクトにまとめ上げた。外観上は、一つの道具としか見えず、マスタによりスレーブを操作しているという意識を生じさせない。

(2) マスタとして、非接触で摩擦のない磁気浮上系を採用することで、CMS ツールを独立した一つの道具に近い状態で操作することが可能となり、機械的に強固に保持された場合に比べ操作性を高めた。また、磁気浮上系の安定化制御のために、二次安定化手法を適用し、さらに低感度特性を考慮した混合感度問題により制御系設計を行った。このとき、操作力を等価的に浮上体の質量変化として捉え、質量変化を構造的な不確かさとしてモデル化した。

(3) 位置と力の増幅率を考慮した力帰還型のバイラテラル制御を採用した。ここで、安定浮上制御が必須であるマスタに対し、位置制御を基礎とした間接的な力制御方式を適用した。

(4) 操作実験の結果から、操作力を加えても安定浮上を維持できることを確認し、指定どおりの増幅率

で操作可能であることを実証した。

今後、バイラテラル制御系における補償器設計を H_∞ 制御理論の枠組みの中で行っていく予定である⁽¹⁹⁾。本研究の一部は、文部省科学研究費〔奨励研究(A)07750290〕および(財)メカトロニクス技術高度化財団の援助のもとで行われたものである。最後に、磁気浮上に関して、適切なご助言をいただいた長岡技術科学大学川谷亮治先生に深く感謝する。

文 献

- (1) 佐藤知正・畑村洋太郎, マイクロマニピュレーション, 日本ロボット学会誌, **12-4** (1994), 560-565.
- (2) 特集, テレロボティクスの理論, 日本ロボット学会誌, **11-6** (1993), 769-827.
- (3) 横小路泰義・細谷徳男・吉川恒夫, マイクロテレオペレーションの操作性と安定性, 第 11 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, **3** (1993), 1053-1054.
- (4) Sato, T., Ichikawa, J., Mitsuishi, M. and Hatamura, Y., Micro Teleoperation System Concentrating Visual and Force Information at Operator's Hand, *Proc. of the 3rd Int. Symp. Experimental Robotics*, (1993), 353-365.
- (5) 中尾政之・矢野崇史・浅井亮介・畑村洋太郎, 微小力制御可能な外科手術用掘削工具の開発, 1996 年度精密工学会春季大会講演会講演論文集, (1996), 337-338.
- (6) 松日楽信人・朝倉誠・番場弘行・植之原道広, 高性能マスタスレーブマニピュレータの開発, 第 2 回ロボットシンポジウム予稿集, (1992), 145-150.
- (7) Kazerooni, H., Human-Robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, **20-2** (1990), 450-463.
- (8) 福田敏男・藤澤佳生・新井史人・ほか 5 名, マン・ロボット協調作業型マニピュレータの基礎的研究(第 1 報, マン・ロボット協調マニピュレータの機構と制御), 機論, **57-541**, C(1991), 2944-2952.
- (9) 小菅一弘・藤澤佳生・福田敏男, 仮想ツールダイナミクスに基づくマン・マシン系の制御, 機論, **60-572**, C(1994), 1337-1341.
- (10) 美多勉, H_∞ 制御, (1994), 58-61, 昭晃堂.
- (11) 坂口正道・佐野明人・古荘純次, H_∞ 制御に基づくロボットアームのインピーダンス制御, 機論, **62-596**, C(1996), 1503-1509.
- (12) Green, P. S., Hill, J. W., Jensen, J. F. and Shah, A., Telepresence Surgery, *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, **14-3** (1995), 324-329.
- (13) 佐野明人・小谷和也・村瀬康弘・藤本英雄, マイクロマニピュレーションのためのマスタスレーブ型ツールの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, (1995), 1412-1415.
- (14) Taylor, R. H., Funda, J., ほか 7 名, A Telerobotic Assistant for Laparoscopic Surgery, *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, **14-3** (1995), 279-288.
- (15) 樋口俊郎・津田匡博, RCC 機能をもつ磁気支持方式精密自動組立用ハンドの設計, 昭和 62 年度精密工学会春季大会講演会論文集, (1987), 421-422.
- (16) 新宮悉太, 磁気浮上形位置決め機構の設計法(第 1 報, アクチュエータ系のシンセシスと非干渉性の機構構造的設計法), 機論, **55-518**, C(1989), 2559-2568.
- (17) Salcudean, S. E. and Wong, N. M., Coarse-Fine Motion

- Coordination and Control of a Teleoperation System with Magnetically Levitated Master and Wrist, *Proc. of The 3rd Int. Symp. Experimental Robotics*, (1993), 406-421.
- (18) 土井智晴・川谷亮治, 2 次安定化による磁気浮上系のロボ
スト制御, 計測自動制御学会論文集, **30**-12 (1994), 1492-1498.
- (19) 佐野明人・藤本英雄, マスタスレーブ一体型ツールの H_∞ 周波数分離制御, 第 5 回インテリジェント FA シンポジウム講演論文集, (1995), 43-44.
-